DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151020

施用河道污泥对水稻和土壤重金属含量及水稻氮素利用的影响*

刘红江 盛 婧 郭 智 张岳芳 陈留根 郑建初**

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 南京 210014)

摘 要 2013—2014 年以苏州市相城区望亭镇某河道污泥为研究对象，以农田施用污泥 20 kg·m^{-2}和不施用污泥为主处理，以施氮肥 120 kg(N)·hm^{-2} (LN)和 240 kg(N)·hm^{-2} (NN)为副处理，连续两季种植粳稻品种'武运粳 24'，研究河道污泥农田施用对水稻和土壤重金属含量及水稻氮素利用的影响。结果表明：1)河道污泥农田施用，显著提高了稻田土壤有机质含量、速效氮含量和重金属 Cu、Zn、Pb 含量，水稻产量平均增加 7.05%，水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量分别增加 53.66%、18.71%和 802.29%，水稻吸氮量显著增加，氮素利用效率显著降低。2)河道污泥施用后，较高施氮量(NN)增加了稻田土壤有机质含量和速效氮含量，对稻田土壤重金属含量和水稻籽粒中重金属含量影响不大，水稻产量、水稻吸氮量显著增加，但氮素利用效率显著降低。3)污泥处理条件下，与第 1 季相比较，第 2 季稻田土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量平均下降 5.0%左右、籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量下降 7.27%~12.65%，但均显著大于不施河道污泥的对照处理。4)污泥×氮肥、污泥×年度、氮肥×年度和污泥×氮肥×年度的互作效应对稻田土壤养分含量、重金属含量，水稻产量、籽粒重金属含量和水稻氮素吸收利用的影响均未达显著水平。

关键词 河道污泥 施氮量 重金属 水稻 产量 氮素利用效率
中图分类号: S141.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0163-10

Effects of dredged sludge application on heavy metal content and nitrogen use efficiency in rice-soil system*

LIU Hongjiang, SHENG Jing, GUO Zhi, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, ZHENG Jianchu**

(Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nangjing 210014, China)

Abstract The application of dredged sludge in agricultural soils has become a promising disposal and utilization method of sludge that improves soil properties and enhances plant productivity. A field experiment of rice ('Wuyunjing 24') cultivation was conducted in 2013 and 2014 with application of 20 kg·m^{-2} dredged sludge from a polluted river in Xiangcheng District, Suzhou City. In the field research, two levels of nitrogen (N) application [LN, 120 kg(N)·hm^{-2}; NN, 240 kg(N)·hm^{-2}] were arranged to determine the effects of application of dredged sludge on physicochemical properties of soil, rice yield, heavy metals contents of rice grain and soil, and nitrogen use efficiency under different N application levels. The results showed that: 1) compared with no dredged sludge application (CK) treatment, field application of dredged sludge significantly increased soil organic matter and available nitrogen contents in paddy field at different growth stages of rice. Dredged sludge application significantly increased the contents of heavy metals (Cu, Zn, Pb) in soil, while it fell below the controlled plant standards for agricultural use. Field application of dredged sludge significantly increased rice yield by 7.05% ($P < 0.01$), the contents of Cu,

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B12)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(13)3047)资助
** 通讯作者：郑建初，主要从事农业生态与农作制研究。E-mail: zjc@jaas.ac.cn
刘红江，主要从事农业生态和水稻栽培生理生态研究。E-mail: liuhongjiang2004@sohu.com
收稿日期: 2015−09−18 接受日期: 2015−11−25

* The study was supported by the National Key Technologies R & D Program of China (No. 2012BAD14B12) and the Fund for Independent Innovation of Agricultural Science and Technology of Jiangsu Province (No. CX(13)3047).
** Corresponding author, E-mail: zjc@jaas.ac.cn
Received Sep. 18, 2015; accepted Nov. 25, 2015

Zn and Pb in rice grain by an average of 53.66% ($P < 0.01$), 18.71% ($P < 0.01$) and 802.29% ($P < 0.01$), respectively. Dredged sludge application improved nitrogen accumulation in rice, but reduced N use efficiency of rice biomass (NUEp) and N use efficiency of rice grain (NUEg). 2) High nitrogen supply increased soil organic matter, available nitrogen, rice yield and rice nitrogen accumulation under application of dredged sludge, but had no effect on the contents of heavy metals in soil and rice grain, while NUEp and NUEg showed the reverse trends. 3) The contents of heavy metals in the soil under dredged sludge treatment decreased by 5.0%, and in rice grain decreased by 7.27%–12.65% in the second experimental season compared with that of the first experimental season. However, the contents of heavy metals in soil under dredged sludge treatment were still higher than that under CK treatment. 4) Most of the interactions between dredged sludge & N, dredged sludge & time, N & time, and dredged sludge & N & time had no significant effect on the contents of soil nutrients and heavy metals, rice yield, heavy metals in rice grain, and on nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of rice. It was therefore concluded that field application of dredged sludge increased soil nutrient, rice yield and heavy metals contents in rice grain and soil. However, nitrogen use efficiency showed the reverse trend.

Keywords Dredged sludge; Nitrogen application rate; Heavy metal; Rice; Rice yield; Nitrogen use efficiency

为了提高作物产量，太湖流域农田化肥投入量在不断增加，投入农田的过量化肥，部分会随雨水径流流向周围的河道，加之生活垃圾和工业废水等向河道的排放，使太湖流域水体氮磷等养分物质含量偏高，呈富营养化状态。相关水质调查数据表明，2008 年太湖水体总氮、总磷浓度分别达 3.5 mg·L^{-1} 和 0.2 mg·L^{-1}[1]。大量污染物进入水体后逐渐富集沉降，使底泥也受到污染。在一定条件下，通过水和底泥的物质交换作用，底泥中的污染物质又会释放到水体中，形成二次污染，长期威胁水体生态系统安全[2]。由于底泥自身养分物质和有机质含量较高，能够培肥地力，促进作物生长。因此，河道污泥农田利用被许多国家大量应用[3–7]。国内关于污泥农田利用的研究，主要集中在生活污泥蔬菜地和草地施用等方面[8–13]，研究结果表明，生活污泥蔬菜地利用能够提高土壤养分含量，增加蔬菜产量[9–10]。生活污泥在玉米(*Zea mays*)地施用的研究结果表明，污泥施用可维持 3 季玉米生长的养分需求，使玉米产量显著优于对照[14]。而对河道污泥处理和利用方面的研究报道较少，这可能与河道污泥的收集处理工程浩大，资金投入量大，以及污泥中存在重金属污染风险等有关。戴亮等[15]将污水处理厂的污泥麦田利用研究表明，污泥施用后对土壤重金属含量影响不大，污泥与土壤的混配比例大于 15%会影响小麦(*Triticum aestivum*)生长。为了探讨太湖流域河道污泥对土壤、水稻产量和氮素利用的影响，本研究结合江苏经济发达地区污染河道治理，经过测定河道污泥基本理化性质，在其符合农田施用标准的前提下，设计农田施用污泥和不施用污泥处理，研究农田施用河道污泥对稻田土壤重金属及水稻(*Oryza. sativa*)品种‘武运粳 24’生长和氮素利用的影响，以期为我国农业生产节能减排和污染河道污泥治理提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于 2013 年和 2014 年在江苏省苏州市望亭镇项路村农业示范园试验田(31°27′N，120°25′E)进行，该地属于北亚热带季风气候，年降水量约 1 100 mm，年平均温度约 15.7 ℃，年日照时间大于 2 000 h，年无霜期大于 230 d。耕作方式为冬小麦、水稻轮作。试验田土壤类型为黄泥土，试验土壤和河道污泥的基本理化性质见表 1。河道污泥重金属元素含量均低于建设部制定的《城镇污水处理厂污泥处置——土地改良用泥质》(GB/T24600—2009)标准。

表 1 试验田土壤及试验用河道污泥的基本理化性质
Table 1 Basic properties of field soil and dredged sludge used in this study

项目 Item	田间土壤 Field soil	河道污泥 Dredged sludge	污泥重金属含量标准 1) Standard
pH	6.83	7.39	
有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	23.67	48.46	
总氮 Total N (g·kg^{-1})	1.73	3.72	
总磷 Total P (g·kg^{-1})	0.41	0.86	
速效氮 Available N (mg·kg^{-1})	45.8	78.6	
速效磷 Available P (mg·kg^{-1})	16.6	43.7	
速效钾 Available K (mg·kg^{-1})	161.4	319.1	
总铜 Total Cu (mg·kg^{-1})	43.1	169.6	1 500
总锌 Total Zn (mg·kg^{-1})	82.6	159.6	4 000
总铅 Total Pb (mg·kg^{-1})	41.5	72.1	1 000
总镉 Total Cd (mg·kg^{-1})	0.1	0.1	10
总铬 Total Cr (mg·kg^{-1})	71.7	71.8	1 000
总镍 Total Ni (mg·kg^{-1})	30.6	195.0	200

1)根据《城镇污水处理厂污泥处置——土地改良用泥质》(GB/T24600—2009, pH≥6.5)。1) According to standard of “Disposal of Sludge from Municipal Wastewater — for Agricultural Use” (GB/T24600—2009, pH ≥ 6.5).

1.2　试验设计

本试验采用裂区试验设计，共 4 个处理组合。主处理为污泥处理：设农田施用污泥(2013 年 5 月将疏浚河道污泥风干，磨碎，过筛。在水稻季整地前，污泥施用量按 20 $kg\cdot m^{-2}$ 均匀施用于农田，再用旋耕机将污泥与 0~15 cm 耕层土壤拌匀，种植水稻)、不施用污泥 2 个水平，2013 年和 2014 年连续种植两季水稻。副处理为施氮量：每季施氮量均为 120 $kg\cdot hm^{-2}$(较低施氮量，LN)和 240 $kg\cdot hm^{-2}$ (较高施氮量，NN) 2 个水平。田间小区试验，各处理面积 15.0 m^2，试验重复 3 次。供试水稻品种为'武运粳 24'，5 月 20 日播种，6 月 15 日人工移栽，密度为 24 穴$\cdot m^{-2}$，行距为 25 cm，株距为 16.7 cm，1 穴 3 苗。氮肥施用时期分别为 6 月 13 日施基肥，6 月 20 日施分蘖肥，7 月 28 日施穗肥。基肥和分蘖肥占总施 N 量的 60%，穗肥占总施 N 量的 40%。施磷、钾量分别为 60 $kg\cdot hm^{-2}$、90 $kg\cdot hm^{-2}$，全部作基肥施用。试验施用氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)含量分别为 15-15-15 的复合肥，氮、钾肥不足的部分由有效含氮量 46%的尿素和有效含钾量 60%的 KCl 补充。水分管理为 6 月 14 日至 7 月 10 日保持浅水层(约 5 cm)，7 月 11 日至 8 月 5 日进行多次轻搁田，8 月 6 日至收割前 7 日进行间隙灌溉。适时进行病虫草害防治，水稻正常生长发育。

1.3　取样和测定方法

1.3.1　土壤有机质含量

土壤有机质含量采用重铬酸钾法测定[16]。在水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期各小区取 0~20 cm 深度的土样，将样品风干、研磨、过筛，称取土样，在加热的条件下，用过量的重铬酸钾–硫酸溶液来氧化土壤样品有机质中的碳，$Cr_2O_7^{2-}$等被还原成 Cr^{3+}，剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定，根据消耗的重铬酸钾量计算出有机碳量，再乘以常数 1.724，即为土壤有机质量。

1.3.2　土壤速效氮含量

在水稻生长期间的分蘖中期、拔节期、抽穗期、成熟期，各小区取有代表性 0~20 cm 深度的土样，将样品风干、研磨、过筛，测定土壤速效氮含量。土壤硝态氮采用 2 $mol\cdot L^{-1}$ KCl 浸提–紫外分光光度法测定；铵态氮采用 2 $mol\cdot L^{-1}$ KCl 浸提–靛酚蓝比色法测定。

1.3.3　土壤重金属含量

土壤重金属(Cu、Zn、Pb)含量采用 $HCl\text{-}HNO_3\text{-}HF\text{-}HClO_4$ 消煮–电感耦合等离子发射仪测定[17]。采用 $HCl\text{-}HNO_3\text{-}HF\text{-}HClO_4$ 酸体系和密闭高压消解罐法将土壤中的重金属消解出来，再使用电感耦合等离子发射根据被测元素的原子或离子，在光源中被激发而产生特征辐射，通过判断这种特征辐射的存在及其强度的大小，对各元素进行定性和定量分析。所使用主要仪器有 ETHOSI 微波消解系统(意大利 Milestone 公司)和 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司)。

1.3.4　植物重金属含量和全氮含量

将植物样品烘干、称重、粉碎、过筛后备用。测定时，先称取好样品，置于消解罐中，加入浓硝酸、过氧化氢，盖好内外盖，将消解罐对称地摆放于微波消解系统的消解盘中，按照低压微波消解程序进行消解，消解完毕后冷却至室温，将样品转移至 50.0 mL 容量瓶中，定容，摇匀后待测[18–21]。植株样品的重金属分析过程中加人国家标准植物样品(GSV-1)进行质量控制，重金属 Cu、Zn 和 Pb 的回收率均在允许范围内(93%~96%)。用半微量蒸馏法测定植株全氮含量[22]。

1.3.5　水稻产量及产量构成

水稻成熟期，每小区调查 100 穴植株的穗数，根据调查的平均穗数取代表性植株 10 穴，测定每穗粒数，用水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空瘪粒，计算饱粒结实率和饱粒千粒重，测得水稻产量。

1.4　统计分析方法

采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析，采用 Microsoft Excel 软件作图。各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法，凡超过 LSD 0.05(或 LSD 0.01)水平的视为显著(或极显著)。

2　结果与分析

2.1　河道污泥农田施用对土壤有机质含量的影响

河道污泥农田施用对稻田土壤有机质含量的影响如表 2 所示。由表 2 可知：1)施用河道污泥使水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期稻田土壤有机质含量分别平均比对照增加 17.21%、18.46%、19.84%和 18.12%。2)与较低施氮量(LN)相比，较高施氮量(NN)在施用污泥和不施用污泥条件下均使水稻不同生育时期稻田土壤有机质含量略有增加。3)污泥处理条件下，2014 年与 2013 年比较，水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期稻田土壤有机质含量分别平均下降 7.04%、11.02%、13.02%和 13.58%。4)统计分析表明，污泥处理、不同年度对稻田土壤有机质含量的影响均达极显著水平；氮处理、污泥×氮、污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对稻田土壤有机质含量的影响均未达显著水平。说明河道污泥农田施用能提高稻田土壤有

表 2　河道污泥农田施用和施氮量对土壤有机质含量的影响

Table 2　Effects of dredged sludge and nitrogen applications on organic matter of paddy soil at different growth stages of rice　g·kg⁻¹

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	分蘖中期 Tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
2013	NN	DS	35.87±0.34	39.57±0.47	37.74±0.96	35.22±0.43
		CK	31.54±0.36	34.14±0.79	32.62±0.95	30.21±0.66
	LN	DS	35.83±0.81	39.12±0.96	36.90±0.77	34.79±0.49
		CK	30.68±0.64	33.61±2.16	31.48±1.35	30.36±0.55
2014	NN	DS	34.53±1.35	36.34±0.87	33.65±1.34	31.28±2.09
		CK	29.24±1.04	29.93±2.40	27.28±0.67	26.53±1.55
	LN	DS	32.45±0.74	34.53±0.92	32.39±1.92	30.36±0.94
		CK	26.86±0.62	28.58±1.65	26.01±2.16	24.36±2.02
显著性 Significance	污泥施用 Dredged sludge application (DS)		**	**	**	**
	施氮 Nitrogen level (N)		ns	ns	ns	ns
	年度 Year (Y)		**	**	**	**
	DS×N		ns	ns	ns	ns
	DS×Y		ns	ns	ns	ns
	N×Y		ns	ns	ns	ns
	DS×N×Y		ns	ns	ns	ns

DS: 河道污泥处理; CK: 对照; LN: 低氮; NN: 常氮; ns, 差异不显著; *: P<0.05; **: P<0.01。下同。DS: dredged sludge treatment; CK: control; LN: low nitrogen with nitrogen application rate of 120 kg·hm^{-2}; NN: normal nitrogen with nitrogen application rate of 240 kg·hm^{-2}; ns: no significant. *: P < 0.05; **: P < 0.01. The same below.

机质含量, 较高施氮量有利于提高稻田有机质含量。污泥处理条件下, 与第 1 季相比较, 第 2 季水稻不同生育时期稻田土壤有机质含量显著下降。总体来看, 水稻分蘖中期到拔节期稻田土壤有机质含量增加, 水稻拔节后, 稻田土壤有机质含量逐渐减小。

2.2　河道污泥农田施用对稻田土壤速效氮含量的影响

河道污泥农田施用对稻田土壤速效氮含量的影响如表 3 所示。由表 3 可知: 1)施用河道污泥使水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期稻田土壤速效氮含量分别平均比对照增加 26.91%、28.48%、36.61%和 27.60%。2)与较低施氮量(LN)相比, 较高施氮量(NN)在施用污泥和不施用污泥条件下均使水稻不同生育时期稻田土壤速效氮含量显著增加, 使水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期稻田土壤速效氮含量分别平均增加 10.72%、19.55%、14.43%

表 3　河道污泥农田施用和施氮量对土壤速效氮含量的影响

Table 3　Effects of dredged sludge and nitrogen applications on available nitrogen of paddy soil at different growth stages of rice　mg·kg⁻¹

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	分蘖中期 Tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
2013	NN	DS	23.35±1.51	46.40±1.17	38.14±1.05	24.46±4.10
		CK	19.20±1.17	34.62±0.70	28.06±0.47	18.54±1.85
	LN	DS	22.57±1.38	37.05±1.85	34.13±0.91	21.62±1.04
		CK	16.39±0.18	29.90±4.95	24.12±0.56	16.38±2.25
2014	NN	DS	26.25±1.00	43.19±2.06	39.79±0.61	27.82±1.47
		CK	21.49±0.49	35.43±3.11	29.56±1.04	21.65±1.06
	LN	DS	23.94±1.09	38.22±1.19	34.59±1.62	23.53±1.55
		CK	18.66±1.30	28.36±1.70	25.61±0.89	19.78±1.45
显著性 Significance	污泥施用 Dredged sludge application (DS)		**	**	**	**
	施氮 Nitrogen level (N)		**	**	**	**
	年度 Year (Y)		**	ns	**	**
	DS×N		Ns	ns	ns	ns
	DS×Y		Ns	ns	ns	ns
	N×Y		Ns	ns	ns	ns
	DS×N×Y		Ns	ns	ns	ns

和 13.72%。3)污泥处理条件下, 2014 年与 2013 年比较, 水稻分蘖中期、抽穗期和成熟期稻田土壤速效氮含量分别平均增加 8.52%、2.84%和 10.26%, 拔节期稻田土壤速效氮含量平均下降 2.51%。4)统计分析表明, 污泥处理、氮处理、不同年度对稻田土壤速效氮含量的影响多达到显著或极显著水平; 污泥×氮、污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对稻田土壤速效氮含量的影响均未达到显著水平。说明河道污泥农田施用和较高施氮量均能提高稻田土壤速效氮含量。

总体来看, 水稻分蘖中期到拔节期稻田土壤速效氮含量增加, 水稻拔节后, 稻田土壤速效氮含量逐渐减小, 总体呈开口向下的抛物线变化趋势。这和稻季农田肥料运筹、污泥所含养分的农田释放规律以及作物对养分的吸收过程密切相关。

2.3　河道污泥农田施用对稻田土壤重金属含量的影响

河道污泥农田施用对水稻成熟期稻田土壤重金属含量的影响如表 4 所示。由表 4 可知: 1)施用河道污泥使水稻成熟期稻田土壤 Cu、Zn、Pb 含量分别平均比对照增加 147.02%、41.62%和 36.39%。2)与较低施氮量(LN)相比, 较高施氮量(NN)在施用污泥和不施用污泥条件下均对水稻成熟期稻田土壤 Cu、Zn、Pb 含量的影响不大。3)污泥处理条件下, 2014 年与 2013 年比较, 水稻成熟期稻田土壤 Cu、Zn、Pb 含量分别平均下降 5.50%、5.03%和 5.52%。4)统计分析表明, 污泥处理对稻田土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量的影响均达到极显著水平; 不同年度对稻田土壤重金属 Cu、Pb 含量的影响达到显著或极显著水平; 污泥×年度的互作效应对稻田土壤重金属 Cu、Pb 含量的影响达到极显著水平; 氮处理、污泥×氮、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对稻田土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量的影响均未达到显著水平。说明河道污泥农田施用会增加稻田土壤的重金属含量。污泥处理条件下, 与第 1 季相比较, 第 2 季水稻成熟期稻田土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量明显下降, 但仍显著大于对照处理。

表 4　河道污泥农田施用和施氮量对稻田土壤重金属含量的影响

Table 4　Effects of dredged sludge and nitrogen applications on the concentration of heavy metals in soil at maturation stage of rice　mg·kg^{-1}

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	Cu	Zn	Pb
2013	NN	DS	115.4±3.87	132.7±1.84	59.5±1.08
		CK	44.9±0.59	91.9±1.80	42.5±1.23
	LN	DS	111.5±2.89	131.1±7.25	59.6±1.04
		CK	44.2±1.54	90.1±5.65	42.6±1.78
2014	NN	DS	108.9±3.61	125.8±3.28	56.5±1.87
		CK	45.1±0.40	91.5±1.21	42.3±1.19
	LN	DS	106.3±2.61	125.4±2.28	56.4±0.75
		CK	44.8±1.46	90.2±3.16	42.7±0.40
显著性 Significance	污泥施用 Dredged sludge application (DS)		**	**	**
	施氮 Nitrogen level (N)		ns	ns	ns
	年度 Year (Y)		*	ns	**
	DS×N		ns	ns	ns
	DS×Y		**	ns	**
	N×Y		ns	ns	ns
	DS×N×Y		ns	ns	ns

2.4　河道污泥农田施用对水稻产量的影响

河道污泥农田施用对水稻产量的影响如表 5 所示。由表 5 可知: 1)施用河道污泥使水稻产量平均比对照增产 63.12 g·m^{-2}, 增产幅度平均为 7.05%。2)与较低施氮量(LN)相比, 较高施氮量(NN)在施用污泥和不施用污泥条件下均能提高水稻产量, 平均增加 8.01%。3)污泥处理条件下, 2014 年与 2013 年比较, 水稻产量平均下降 3.62%。4)统计分析表明, 污泥处理、氮处理、不同年度、污泥×氮的互作效应对水稻产量的影响均达到显著或极显著水平; 污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对水稻产量的影响均未达显著水平。说明施用污泥和较高施氮量均有利于提高水稻产量。

河道污泥农田施用对水稻产量构成因素的影响表明: 1)施用河道污泥使水稻单位面积穗数、每穗粒数、结实率和千粒重分别平均比对照增加 2.96%、

表 5 河道污泥农田施用和施氮量对水稻产量及其构成因素的影响
Table 5 Effects of dredged sludge and nitrogen applications on yield and yield components of rice

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	每平米穗数 Panicles number per m^2	每穗粒数 Grains number per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield ($g·m^{-2}$)
2013	NN	DS	285.14±0.68	152.50±2.40	91.12±0.51	25.61±0.05	1 014.70±13.61
		CK	277.98±4.04	147.21±1.65	90.58±0.18	25.29±0.13	937.37±16.41
	LN	DS	275.42±5.59	146.22±3.21	91.62±0.18	25.36±0.17	935.62±28.36
		CK	268.53±4.15	142.79±1.50	90.72±0.45	25.37±0.20	882.41±11.22
2014	NN	DS	284.73±2.93	155.62±0.90	82.69±0.75	26.94±0.22	986.83±9.42
		CK	276.80±7.13	146.86±1.26	83.86±0.91	26.71±0.40	910.08±5.24
	LN	DS	272.82±4.21	145.02±3.46	86.11±1.58	26.28±0.13	895.28±17.87
		CK	262.70±2.89	141.96±2.05	86.54±0.67	26.34±0.29	850.09±13.15
显著性 Significance	污泥施用 Dredged sludge application (DS)		**	**	ns	ns	**
	施氮 Nitrogen level (N)		**	**	**	**	**
	年度 Year (Y)		ns	ns	**	**	**
	DS×N		ns	ns	ns	ns	*
	DS×Y		ns	ns	*	ns	ns
	N×Y		ns	ns	**	*	ns
	DS×N×Y		ns	ns	ns	ns	ns

3.55%、–0.05%和 0.47%。2)与较低施氮(LN)相比，较高施氮量(NN)使水稻单位面积穗数、每穗粒数、结实率和千粒重平均分别增加 4.19%、4.55%、–1.90%和 1.15%。3)污泥处理条件下，2014 年与 2013 年比较，水稻单位面积穗数、每穗粒数、结实率和千粒重分别平均下降 0.54%、–0.64%、8.25%和–4.23%。4)统计分析表明，污泥处理对水稻单位面积穗数和每穗粒数的影响达到极显著水平；氮处理对水稻单位面积穗数、每穗粒数、结实率和千粒重的影响均达到极显著水平；不同年度对水稻结实率和千粒重的影响达到极显著水平；污泥×氮、污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对水稻产量构成因素的影响多未达到显著水平。说明施用河道污泥提高水稻产量，主要是因为其提高了水稻的单位面积穗数和每穗粒数。

2.5 河道污泥农田施用对水稻籽粒重金属含量的影响

河道污泥农田施用对水稻籽粒重金属含量的影响如表 6 所示。由表 6 可知：1)施用河道污泥使水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量分别平均比对照增加 53.66%、18. 71%和 802.29%。2)与较低施氮量(LN)相比，较高施氮量(NN)在施用污泥和不施用污泥条件下均对水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量影响不大。3)污泥处理条件下，2014 年与 2013 年比较，水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量分别平均下降 12.65%、7.27%和 7.83%，除 Pb 以外，均符合食品卫生标准(GB 2762—2005)中重金属(Cu≤10 $mg·kg^{-1}$, Pb≤0.2 $mg·kg^{-1}$, Zn≤50 $mg·kg^{-1}$)含量的要求。4)统计分析表明，污泥处理对水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量的影响均达到极显著水平；不同年度对水稻籽粒中重金属 Cu、Pb 含量的影响达到极显著水平；氮处理、污泥×氮、污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量的影响多未达到显著水平。说明河道污泥农田施用会显著增加水稻籽粒中的重金属含量。污泥处理条件下，与第 1 季相比较，第 2 季水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量明显下降，但仍然要显著大于对照处理。

2.6 河道污泥农田施用对水稻氮素吸收利用的影响

河道污泥农田施用对水稻氮素吸收利用的影响如表 7 所示。由表 7 可知：1)施用河道污泥使水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数分别平均比对照增加 9.70%、–4.80%、–8.21%和–1.61%。2)与较低施氮量(LN)相比，较高施氮量(NN)使水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数分别平均增加 24.39%、–7.98%、–9.00%和–2.03%。3)污泥处理条件下，2014 年与 2013 年比较，水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数分别平均下降 3.72%、0.44%、3.96%和 0.10%。4)统计分析表明，污泥处理对水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率的影

表 6　河道污泥农田施用和施氮量对水稻籽粒重金属含量的影响

Table 6　Effects of dredged sludge and nitrogen applications on contents of heavy metals in rice grain　　mg·kg^{-1}

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	Cu	Zn	Pb
2013	NN	DS	11.35±0.84	41.63±2.88	1.47±0.01
		CK	7.06±0.52	35.15±2.61	0.16±0.00
	LN	DS	10.91±0.16	41.90±1.24	1.46±0.03
		CK	7.02±0.43	33.12±2.87	0.16±0.00
2014	NN	DS	9.95±0.08	38.77±1.42	1.38±0.04
		CK	6.55±0.19	34.19±1.84	0.16±0.00
	LN	DS	9.81±0.07	39.10±0.98	1.34±0.05
		CK	6.71±0.18	33.50±0.90	0.15±0.01
显著性 Significance	污泥施用 Dredged sludge application (DS)		**	**	**
	施氮 Nitrogen level (N)		ns	ns	ns
	年度 Year (Y)		**	ns	**
	DS×N		ns	ns	ns
	DS×Y		ns	ns	*
	N×Y		ns	ns	ns
	DS×N×Y		ns	ns	ns

表 7　河道污泥农田施用和施氮量对水稻氮素吸收利用的影响

Table 7　Effects of dredged sludge and nitrogen applications on nitrogen uptake and utilization of rice

年度 Year	氮水平 Nitrogen level	污泥施用 Dredged sludge application	总吸氮量 Nitrogen accumulation (g·m^{-2})	氮素干物质生产效率 Nitrogen use efficiency for biomass (g·g^{-1})	氮素籽粒生产效率 Nitrogen use efficiency for grain yield (g·g^{-1})	氮素收获指数 Nitrogen harvest index
2013	NN	DS	22.14±0.44	80.28±0.36	39.44±0.70	0.51±0.01
		CK	19.71±0.38	84.65±0.46	43.13±0.89	0.53±0.01
	LN	DS	17.55±0.47	87.14±0.75	43.63±0.31	0.53±0.00
		CK	15.53±0.48	92.98±1.00	47.47±0.69	0.53±0.01
2014	NN	DS	21.01±0.59	79.93±1.80	38.62±0.61	0.51±0.01
		CK	19.73±0.34	83.43±0.93	41.06±0.57	0.52±0.01
	LN	DS	17.25±0.41	86.76±0.84	41.29±0.39	0.53±0.02
		CK	16.07±0.80	89.88±0.68	45.93±0.63	0.54±0.01
显著性 Significance		污泥施用 Dredged sludge application (DS)	**	**	**	ns
		施氮 Nitrogen level (N)	**	**	**	*
		年度 Year (Y)	ns	**	**	ns
		DS×N	ns	ns	*	ns
		DS×Y	ns	*	ns	ns
		N×Y	ns	ns	ns	ns
		DS×N×Y	ns	ns	ns	ns

响达极显著水平；氮处理对水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数的影响均达显著或极显著水平；不同年度对水稻氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率的影响达极显著水平；污泥×氮、污泥×年度、氮×年度和污泥×氮×年度的互作效应对水稻氮素吸收利用的影响多未达显著水平。说明河道污泥农田施用和较高施氮量会显著增加水稻的总吸氮量，但使氮素的利用效率显著降低。

3　讨论

土壤有机质是土壤肥力物质，可不断供给作物生长所需的各种营养、改善作物营养水平。前人研究表明[23−24]，施用适量生活污泥，可明显增加土壤有机质的含量，有效改善土壤结构性质，对农业生产可起到积极的作用。本研究表明，施用河道污泥

使水稻不同生育时期稻田土壤有机质含量显著提高，与前人的研究结果基本一致，说明施用河道污泥能够提高稻田土壤有机质含量，促进水稻的生长和产量的提高。本研究还表明，较高施氮量有利于提高稻田有机质含量，可能与较高的施氮量能够满足作物的养分需求，减缓了土壤有机质的降解有关。土壤速效养分是指土壤所提供的植物生长所必需的易被作物吸收利用的营养元素。土壤速效养分是评价土壤自然肥力的主要因素之一。本研究表明，较高施氮量使水稻不同生育时期稻田土壤速效氮含量显著增加，与大量研究结果一致。柏彦超等[25]研究表明，施用生活污泥使滩涂土壤速效氮素含量增加 1 倍。本研究表明，施用河道污泥使水稻不同生育时期稻田土壤速效氮含量增加 20%~30%。提高的幅度小于前人的研究结果，可能因为前人研究的滩涂土壤的氮含量较低，因此污泥施用后，土壤速效养含量增加幅度较大。此外本研究结果还表明，稻田施用河道污泥后，水稻生育后期土壤速效氮含量仍然显著高于对照，这与翟丽梅等[9]的研究结果，施用污泥有利于增加白菜(*Brassica oleracea* var. *capitata*)生长后期土壤磷酸酶的活性和土壤可溶性磷含量的结果基本一致，说明施用污泥能够持续供给作物生长所需养分。

多点取样调查表明，苏南地区农村河塘底泥已受到轻度的重金属污染，部分采样点 Cu、Zn 和 Pb 已达到中度污染[26]，本研究结果所用河道污泥与其基本一致。关于施用污泥对土壤中重金属含量的影响，戴亮等[15]通过污泥麦田施用研究表明，施用污泥后，土壤 Cu、Zn 和 Pb 含量均显著增加，但土壤中的 3 种重金属含量均未超过我国土壤环境质量二级标准中(GB15618—1995)中性土壤的限制性标准值。本研究河道污泥重金属含量符合土地改良用泥质标准，农田施用后会显著增加水稻不同生育时期稻田土壤 Cu、Zn 和 Pb 含量，施氮量对水稻不同生育时期稻田土壤重金属含量影响不大，与前人的研究结果基本一致。为了探明污泥作为肥料施用对土壤的长期影响，许田芬等[14]通过连续种植玉米，对土壤重金属含量进行了研究，结果表明，2 年 4 季玉米后施用污泥的土壤全 Zn 和全 Pb 含量与对照已无明显差异。本研究还表明，污泥处理条件下，与第 1 季相比较，第 2 季水稻成熟期稻田土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量明显下降，但仍显著大于对照处理。关于河道污泥农田施用对稻田土壤重金属含量的后续长期效应，需要进一步深入研究。

关于污泥施用对作物产量的影响，翟丽梅等[9]研究表明，生活污泥和磷肥混施能够显著提高白菜的产量，并能降低土壤磷积累引起的环境风险。杨丽标等[10]研究表明，生活污泥单施以及生活污泥和尿素混施，能够使芹菜(*Apium graveolens*)的产量提高 15%左右。污泥农用的后续效应研究表明，污泥施用可维持 3 季玉米的生长，使玉米的产量显著优于对照[14]。本研究表明，河道污泥农田施用，2013 年和 2014 年均可显著提高水稻的产量，水稻产量提高主要是因为河道污泥农田施用提高了水稻的穗数和穗粒数。说明河道污泥农田施用能够提高土壤肥力，持续供应作物生长的养分需求，提高作物产量。本研究还表明，污泥处理条件下，与第 1 季相比较，第 2 季水稻产量平均下降 3.62%。有关河道污泥农田施用对后续作物水稻生长及产量的影响值得进一步研究。本研究，较高施氮量有利于提高水稻产量，与常规栽培条件下较高氮肥施用量能获得水稻高产一致。

关于施用污泥对作物重金属含量的影响，陈涛等[12]研究表明，结缕草(*Zoysia japonica*)在施用污泥的土壤上生长 3 个月后，草体地上部分吸收的 Cd 约为施入土壤中 Cd 的 1%。许田芬等[14]对农田施用污泥后种植的玉米研究表明，玉米籽粒和茎叶重金属含量均达到饲用标准，连续种植 3 季后，玉米籽粒的重金属含量显著下降，达到食用标准。本研究表明，河道污泥农田施用使水稻籽粒重金属含量极显著增加，2013 年污泥处理水稻籽粒中 Zn 和 Cd(未检出)的含量符合食品卫生标准，Cu 和 Pb 不符合该标准(Cd≤0.1 mg·kg^{-1}，Cu≤10 mg·kg^{-1}，Pb≤0.2 mg·kg^{-1}，Zn≤50 mg·kg^{-1})[27]，但符合饲料标准[28]。因此，施用污泥后第 1 季生产的水稻作为食用存在一定的风险，应该作为饲料使用。本研究还表明，污泥处理条件下，与第 1 季相比较，第 2 季水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量分别平均下降 12.65%、7.27%和 7.83%，水稻籽粒中重金属 Cu、Zn 的含量均已符合食品卫生标准，但 Pb 的含量超标，只能作为饲料施用。本研究，无论在施用污泥还是不施用污泥条件下施氮量均对水稻籽粒中重金属含量影响不大，说明施肥量不能影响农田土壤重金属含量。关于河道污泥农田施用对后续种植水稻籽粒重金属含量的影响，有待于进一步研究。

关于污泥农田施用对作物氮素累积量的影响，有关研究表明，湖泊底泥使小麦籽粒氮素累积量比对照增加 35.6%~292.8%，处理间的差异均达到显著水平[29]。本研究表明，河道污泥农田施用和较高施

氮量使水稻植株成熟期氮素累积量显著提高，与前人的研究结果基本一致。关于生活污泥或湖泊底泥农田施用后对水稻氮素利用效率的影响目前少见报道，生活污泥堆肥后对芹菜生长影响的研究表明，在施氮量为 0.15~0.38 g·kg^{-1} 土壤时，芹菜的氮素利用效率表现为最高[10]。本研究表明，施用河道污泥使水稻单位氮素干物质生产效率和籽粒效率均极显著降低，表明与吸收同样多氮素的对照相比，施用河道污泥并没有表现出生物产量和经济产量的优势。说明河道污泥与化肥配施时，总施氮量在适量的条件下才有利于提高其利用效率，这与前人在蔬菜上的研究结果基本一致。因此在施用河道污泥的同时，应该适当降低农田氮肥的施用量，以提高水稻氮素利用效率，减小稻田氮素损失造成的地下水污染和江(湖)水富营养化等环境问题，提高稻作生产的经济效益与生态效益。

4　结论

1)河道污泥农田施用使水稻不同生育时期稻田土壤有机质含量和速效氮素养分含量显著提高。农田施用河道污泥，使稻田土壤几种重金属含量提高，但均未超过土地改良用泥质标准。

2)农田施用河道污泥使水稻产量显著增加，其主要原因是水稻的穗数和穗粒数较大幅度提高。农田施用河道污泥使水稻籽粒中的重金属含量明显增加，但均在饲用标准以内。

3)污泥处理条件下，与第 1 季相比，第 2 季稻田土壤和水稻籽粒中重金属 Cu、Zn、Pb 含量均明显下降，但显著大于对照处理。

4)河道污泥农田施用能显著增加水稻的总吸氮量，但使氮素的利用效率显著降低。说明在农田施用河道污泥条件下，如何兼顾水稻氮素吸收和利用的矛盾，还有待进一步研究。

5)关于河道污泥农田施用对稻田土壤和水稻生长的后续长期效应，值得进一步深入研究。

参考文献　References

[1] 成芳，凌去非，徐海军，等. 太湖水质现状与主要污染物分析[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(1): 105–110
Cheng F, Ling Q F, Xu H J, et al. Assessment of water quality and the main pollutions of Taihu Lake[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(1): 105–110

[2] 王学东，李贵宝，王殿武，等. 湿地土壤对苯酚的净化能力及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 135–138
Wang X D, Li G B, Wang D W, et al. Study on purification ability of wetland soil and influence factor of phenol[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 135–138

[3] 王坤，梁倩，王飞，等. 湖泊底泥土地利用对土壤中重金属铅、铜形态影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1614–1619
Wang K, Liang Q, Wang F, et al. Effect of land use of lake sediments on lead and copper fractionation in soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(9): 1614–1619

[4] Fytili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1): 116–140

[5] Corrêa R S, White R E, Weatherley A J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils[J]. Waste Management, 2006, 26(6): 614–619

[6] Singh R P, Agrawal M. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants[J]. Chemosphere, 2007, 67(11): 2229–2240

[7] 李琼，华珞，徐兴华，等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. 中国生态农业学报，2011，19(2): 468–476
Li Q, Hua L, Xu X H, et al. A review on environmental effects and control criteria of biosolid agricultural application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 468–476

[8] 李淑芹，田仲鹤，金宏鑫，等. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报，2014，33(2): 352–357
Li S Q, Tian Z H, Jin H X, et al. Effects of municipal sludge composts on heavy metal accumulation in soil and soybean[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(2): 352–357

[9] 翟丽梅，张继宗，刘宏斌，等. 生活污泥对白菜供磷和土壤磷状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(3): 688–694
Zhai L M, Zhang J Z, Liu H B, et al. Availability and Chinese cabbage uptake of phosphorous in the soil amended with domestic sewage sludge[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 688–694

[10] 杨丽标，张丽娟，邹国元，等. 生活污泥堆肥氮磷矿化特性及对芹菜生长的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 833–837
Yang L B, Zhang L J, Zou G Y, et al. Research on nitrogen and phosphorus mineralization character of sewage sludge compost and its impact on celery's growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 833–837

[11] 闫双堆，卜玉山，刘利军. 污泥复混肥对早熟禾草坪草生长性状及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报，2008，16(5): 1104–1108
Yan S D, Bu Y S, Liu L J. Effect of sewage sludge compound fertilizer on soil enzyme activity and growth of *Poa annua* Linn[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(5): 1104–1108

[12] 陈涛，王新，梁仁禄，等. 污泥草地利用的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 463–466
Chen T, Wang X, Liang R L, et al. Sewage sludge as fertilizer for grassland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(4): 463–466

[13] 林晓燕，王慧，王浩，等. 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4234–4240

Lin X Y, Wang H, Wang H, et al. Using hybrid giant napier to treat municipal sewage sludge and produce plant biomass[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4234–4240

[14] 许田芬, 谢方文, 丘锦荣, 等. 污泥植物处理后对玉米生长及土壤重金属含量的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1640–1646
Xu T F, Xie F W, Qiu J R, et al. Maize growth and soil heavy metal changes after application of phyto-treated sewage sludge[J]. China Environmental Science, 2012, 32(9): 1640–1646

[15] 戴亮, 任珺, 陶玲, 等. 污泥施用对土壤及小麦生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 362–368
Dai L, Ren J, Tao L, et al. Effects of sewage sludge application on soil and physiological property of *Triticum aestivum*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(2): 362–368

[16] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤和农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 67–116
Agro-Chemistry Professional Committee in Soil Science Society of China. General Analytical Method of Soil and Agro-Chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1983: 67–116

[17] 王北洪, 马智宏, 付伟利. 密封高压消解罐消解–原子吸收光谱法测定土壤重金属[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 255–259
Wang B H, Ma Z H, Fu W L. Determination of heavy metal and Cd in soil by high pressure sealed vessels assisted digestion-atomic absorption spectrometry[J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(S2): 255–259

[18] 卫生部. GB/T 5009.12—2003 食品安全国家标准, 食品中铅的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
The Ministry of Health. GB/T 5009.12—2003 National food safety standard, determination of lead in foods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004

[19] 卫生部. GB/T 5009.13—2003 食品安全国家标准, 食品中铜的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
The Ministry of Health. GB/T 5009.13—2003 National food safety standard, determination of copper in foods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004

[20] 卫生部. GB/T 5009.14—2003 食品安全国家标准, 食品中锌的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
The Ministry of Health. GB/T 5009.14—2003 National food safety standard, determination of zinc in foods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004

[21] 卫生部. GB/T 5009.15—2003 食品安全国家标准, 食品中镉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
The Ministry of Health. GB/T 5009.15—2003 National food safety standard, determination of cadmium in foods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 12

[23] 许光辉, 伯彦超, 汪莉, 等. 生活污泥对滩涂土壤性质和苏丹草生长及重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1321–1327
Xu G H, Bai Y C, Wang L, et al. Effects of sewage sludge application on the properties of mudflat saline soil, the growth and heavy metal accumulation of sudangrass [*Sorghum Sudanense* (Piper) Stapf][J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1321–1327

[24] 胡学峰, 卜玉山. 施用城市生活污泥对土壤肥力长期效应的影响[J]. 山西农业科学, 2009, 37(6): 50–53
Hu X F, Bu Y S. The long-term effects of sewage sludge to two type of soil fertility[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2009, 37(6): 50–53

[25] 柏彦超, 汪莉, 陶天云, 等. 施用生活污泥改良滩涂土壤理化性状的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 1019–1025
Bai Y C, Wang L, Tao T Y, et al. Study on the amendment of physicochemical properties of tidal flat soil by sewage sludge application[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 1019–1025

[26] 冯艳红, 林玉锁, 张孝飞, 等. 苏南地区农村河塘底泥中重金属污染调查与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(5): 19–22
Feng Y H, Lin Y S, Zhang X F, et al. Investigation and assessment on heavy metal pollution in ponds sediment of southern Jiangsu Province[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2007, 19(5): 19–22

[27] 卫生部. GB 2762—2005 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
The Ministry of Health. GB 2762—2005 Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2005

[28] 国家质量监督检验检疫总局. GB 13078—2001 饲料卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 13078—2001 Hygienical standard for feeds[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004

[29] 付克强, 王殿武, 李贵宝, 等. 城市污泥与湖泊底泥土地利用对土壤–植物系统中养分及重金属 Cd、Pb 的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 62–66
Fu K Q, Wang D W, Li G B, et al. Effects of land utilization of municipal sludge and lake sediment on nutrients and heavy metals (Cd, Pb) in soil-plant system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 62–66